

ライフサイクルインベントリー (LCI) 分析による 紙マテリアルフローのモデル化

1. はじめに
2. 紙リサイクルにおける古紙利用の現状分析
3. 紙マテリアルフローモデルの構築
4. ライフサイクルインベントリー分析
5. おわりに

稲 員 とよの*
小 泉 明*
岡 田 阿 礼*

要 約

循環型社会の構築にとって都市廃棄物の再利用・再資源化は重要な課題となっている。紙ごみは可燃ごみの約半量を占め、環境負荷の削減、及び天然資源の有効利用の観点より、紙リサイクルの促進が望まれる。継続的なリサイクル実現のためには、生産者、行政、消費者間の合意形成が必要であり、リサイクル施策や目標値設定の効果を計量化するモデルが求められている。

着目するシステムへの投入と排出を含めたライフサイクル全体の環境影響を定量化する方法としてLCAがある。本研究では、紙の生産、消費、再利用、廃棄という半循環型の流れを対象として、LCAのインベントリー分析(LCI)を適用して資源消費と環境負荷を算定すると共に、総費用の算定を行う紙マテリアルフローモデルを提案する。

提案するモデルは、古紙利用における質的側面と、生産・消費における地域連関とを考慮したものとなっている。本モデルを用いて、ライフサイクルの一部が変化した場合の、すなわち紙リサイクル代替案による比較分析を行うことにより、環境影響削減と総費用間のトレードオフを把握することができ、紙リサイクル計画の評価が可能となった。

1. はじめに

生産され消費された物の大部分は廃棄物となつて排出されるが、近年、資源の枯渇防止、環境負荷の低減、処分場残余容量の確保等の観点から、

廃棄物の再利用・再資源化(リサイクル)を図り循環型のシステムを構築しようとする動きが高まってきている。リサイクルは基本的には資源を有効に利用しようとするものであるが、その過程でまた別の資源(エネルギー)を消費したり、回収や加工のために輸送が必要になったりするため、

*東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻

経済性との間にトレードオフを生じる場合が多い。また、継続的なリサイクルを実現するためには、製品の購買者であり回収主体でもある消費者も含め、生産者及び行政の3者による協力体制の確立が必要であり、3者の合意形成のためにもリサイクル代替案や設定目標値により生ずる効果を計量化する方法が求められている。

環境への負荷を考慮したごみ処理計画代替案の評価方法に関する研究としては、DEMATEL法を広域ごみ処理計画に適用し総合評価指標を選択する研究¹⁾、マテリアルフロー分析を用いたコンクリート産業に関する研究²⁾、廃棄物を含めた産業連関分析による研究³⁾、ライフサイクルアセスメントをPETボトルのリサイクルに適用した研究⁴⁾等がある。なかでも、資源採取から最終的な廃棄までの全ライフサイクルを対象として、システムへの資源投入、システム外への排出、システム内での輸送を含めた環境影響を定量化し、ライフサイクルの一部を変化させた時の分析・評価が可能なLCA (Life Cycle Assessment) 法が注目される。典型的なLCAのプロセスは、目的及びシステム境界の設定、資源消費と環境負荷の大きさを定量化するインベントリー分析、影響因子間に等価係数を設定し評価指標を得る影響分析、感度分析等により結果を解釈し改善すべき施策について検討するライフサイクル解釈の4段階で構成される⁵⁾。

本研究では、紙を対象として取上げる。紙ごみは可燃ごみの約半分を占め、廃棄物処分量低減のためにもリサイクル促進が期待されている⁶⁾。紙は天然資源である木材を由来とするパルプと、古紙によるパルプとを原料として生産され、一度使用された紙が再び原料として消費される半開放型の循環システムを形成している。紙の利用目的は、主に、情報用、包装用、衛生用、工業用に分れ、これらの用途によって、緻密性、強度、印刷適性、防湿性等、異なる性能が求められる。このため、紙リサイクルには量的な側面に加え、質的な特性が大きく関わっており、複雑なシステムを形成している。

そこで本論文では、紙の生産、回収、再利用、廃棄の全体をマテリアルフローシステムとして捉え、そのモデル化を試みる。すなわち、まず古紙

利用の経年変化及び現状の分析を行って、紙マテリアルフローの特性を把握する。つぎに、システム全体としての消費エネルギー、環境負荷排出量、総費用を算出するため、輸送を考慮した紙循環のモデル化を行う。さらに、このモデルを用い古紙消費率による比較分析を行い、環境への影響と費用による両面からリサイクル代替案を評価する。なお、通常のLCAにおけるインベントリー分析は環境影響指標のみを対象としているが、リサイクルを含めた廃棄物施策決定のための情報を提供するモデルとしては、費用の指標は不可欠であり、本論文では、環境影響指標に費用を追加した評価をインベントリー分析と呼ぶものとする。

2. 紙リサイクルにおける古紙利用の現状分析

まず全国の紙生産高について、1975年から1997年までの推移を検討する。通産省紙・パルプ統計年報によると⁷⁾、紙生産高は景気の動向による多少の波はあるものの10年で約1.4倍という順調な伸びを示している(図1)。なかでも印刷・情報用紙が、カラー印刷用や、コピー及びOA用を中心に増加して最近10年間で約2倍の生産高となっており、コンピュータの普及は紙を消費する方向に作用しているものと推測される。また、様々な分野の包装・輸送資材として利用される段ボールの材料である段ボール原紙も1982年以降ほぼ直線的に伸びている。その結果1997年現在では、全紙生産高のうち、印刷・情報用紙が36%、段ボール原紙が30%を占めるようになった(図2)。一方、新聞用の新聞巻取紙は、バブル期に増加したものの、その後一時的な減少傾向から横這い状態に転じ、現在全紙生産高の10%程度のシェアを占めている。その他では、紙箱や本の表紙に使われる紙器用板紙と、ティッシュペーパーやトイレットペーパー等の衛生用紙が微増傾向を示している。このように、紙生産高の推移は社会的及び経済的要因の影響を受け、紙品目により異なった傾向を示している。紙全体としては、今後もOA化の拡大や広告関連の伸びとともに生産高は増加していくと考えら

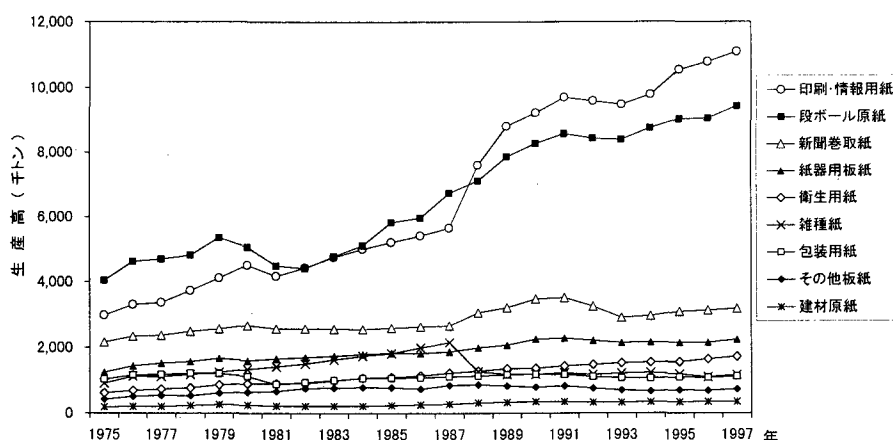


図1 紙生産高の推移

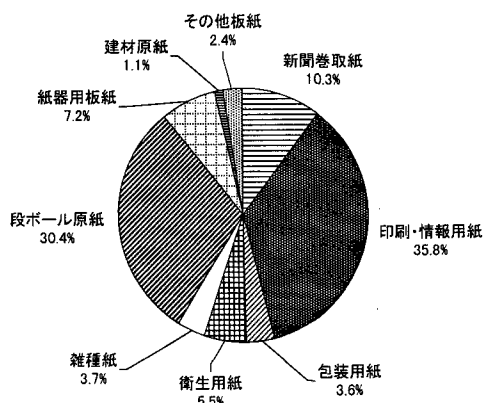


図2 紙生産高の品目内訳 (1997年)

れ、「容器包装に係わる分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」(包装容器リサイクル法)の影響によりプラスチック製品が減少傾向にあり代替包装資材として紙の需要も予想されることから、近年の増加傾向はしばらく継続するものと推測される。

生産された紙類は、事業所及び家庭において消費された後、古紙として回収されるものと、廃棄物として焼却処理場に搬入されるものに別れる。また、屋根や壁に残存する建材原紙や、トイレトーパーのように、ほとんど古紙として回収されないものも多少存在する。古紙として回収される紙としては、印刷・製本工場や紙器工場から裁

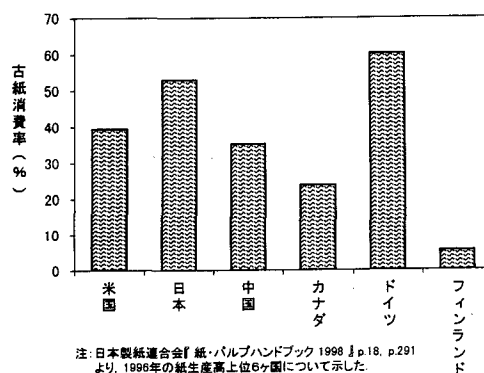
断落ち等として回収される上質古紙(産業古紙)、家庭や事業所から回収される新聞古紙、雑誌古紙、段ボール古紙等があり、古紙問屋を中心とする種々のルートを経て製紙会社に購入され、新たな紙の原料となる。一方、家庭から廃棄物として収集され、または事業所から焼却処理場に持込まれた紙ごみは、焼却され焼却灰となって最終的に埋立て処分される。

紙リサイクルの進展を表す指標には、古紙消費率と回収率がある。

$$\text{古紙消費率} = \text{古紙消費量} / \text{紙生産高}$$

$$\text{古紙回収率} = \text{古紙回収量} / \text{紙消費量}$$

両者の違いは、輸出入及び在庫量の変化分であり、古紙回収率が高くても、古紙をリサイクル原料と



注: 日本製紙連合会『紙・パルプハンドブック 1998』p.18, p.291
より、1996年の紙生産高上位6ヶ国について示した。

図3 古紙消費率の比較 (1996年)

して利用せずそのまま輸出している場合には、古紙消費率が低くなる。1997年の紙生産高は3101万トン、古紙消費量は1650万トンで、古紙消費率は53%となる。図3に主要な紙生産国についての比較を示すが、日本はリサイクル先進国であるドイツに次いで高い古紙消費率を達成している。

古紙としての回収量が増えれば、相対的に紙ごみとしての廃棄物量は減るわけであり、環境への排出負荷を軽減できる。また、紙生産の原料という点で見れば、古紙パルプは木材パルプの代替品となる。木材パルプは、建築材料に向かない低質材や製材残材を原料としているものの、木材資源は有限であり、古紙パルプ利用の促進が資源の有効利用として望ましいと考えられる。

ところで、製紙産業におけるリサイクル原料としての古紙の需要には、量的なもののみならず質的な問題が影響する。古紙統計年報の古紙消費原単位をもとに⁸⁾、紙品目別の古紙と木材パルプの消費量を求め図4に示す。これを見ると、新聞巻取紙及び衛生用紙は古紙と木材パルプをほぼ同量消費しているのに対し、印刷・情報用紙、包装用紙、雑種紙は木材パルプの消費量が古紙の利用率が低い。反対に、ダンボール原紙及び紙器用板紙は古紙消費量が古紙と木材パルプを消費していない品目であることが分る。また、古紙品目別に見ると、ダンボール古紙はダンボール原紙とその

他板紙へ、雑誌古紙は紙器用板紙とダンボール原紙へ、新聞古紙は新聞巻取紙と印刷・情報用紙へ、上質古紙は衛生用紙を始めとする種々の品目へという主な流れが存在する。これは、紙の品目によって強度、印刷適性、緻密性等要求される性能が異なるため、原料としての古紙品目と木材パルプの選択結果が現れたものである。さらに、古紙品目と紙品目の対応を検討すると、ダンボール原紙や新聞巻取紙のように回収ルートの確立されている古紙は良く利用されているのに対し、印刷・情報用紙、包装用紙、紙器用板紙のように回収ルートが十分確立されていない品目は古紙としての利用が少なく、生産高の5割以上が廃棄物となっていると言える⁹⁾。

以上の検討の結果、紙リサイクルにおける古紙の利用は、社会・経済の影響、紙の量的及び質的特性、古紙回収ルートの状況等に左右されていると考えられる。合理的で経済的な紙リサイクル計画を策定するには、生産・消費・廃棄及び再利用という紙の流れに沿って、紙品目を考慮したモデル化が必要であることが明らかとなった。

3. 紙マテリアルフローモデルの構築

ここでは、紙の原料であるパルプ生産から、紙生産、消費、回収、紙ごみの処理・処分に至るラ

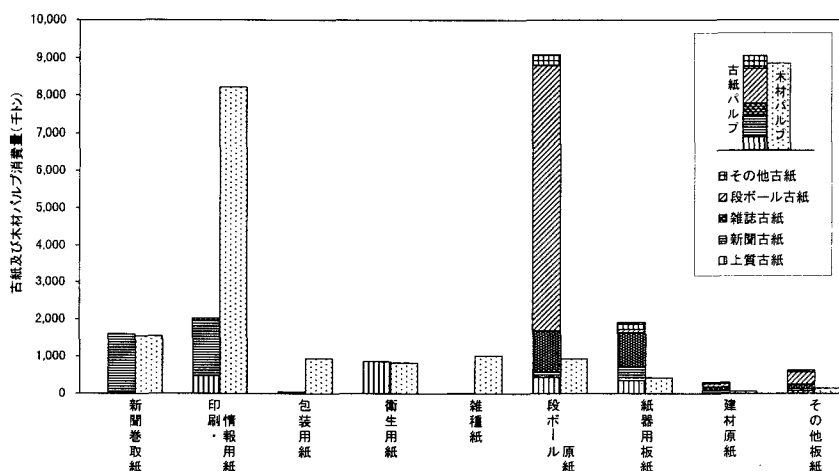


図4 紙品目別原料内訳

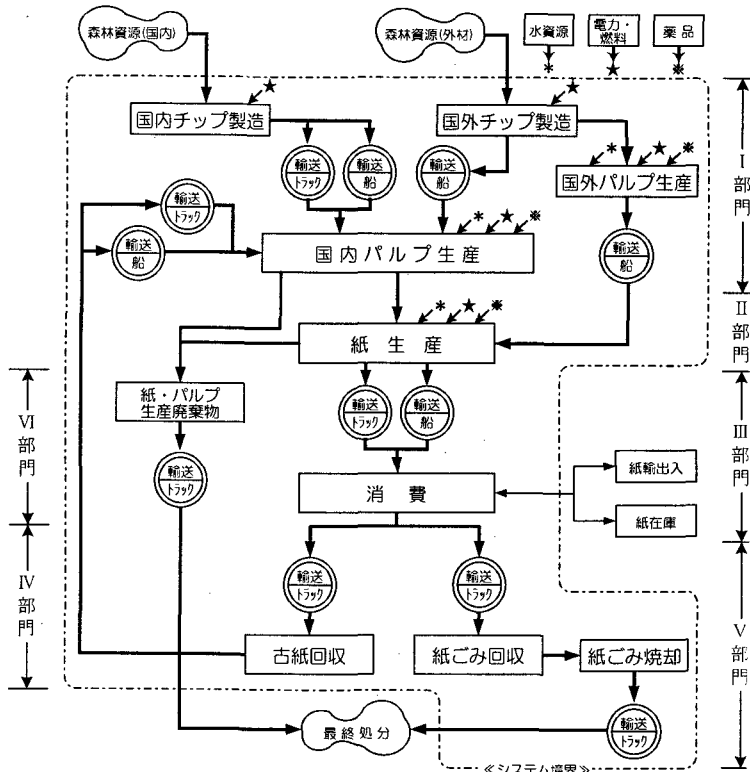


図5 紙マテリアルフローモデル

ライフサイクル全体を対象として、費用、消費エネルギー、及び CO_2 排出量を算定し、紙リサイクル代替案を評価するための紙マテリアルフローモデルを提案する。

本モデルは図5に示すように、Ⅰ.パルプ部門、Ⅱ.紙部門、Ⅲ.消費部門、Ⅳ.古紙部門、Ⅴ.紙ごみ部門、Ⅵ.紙・パルプ生産廃棄物の6部門で構成される。システムへの投入としては、石油等化石燃料、電力、水資源、薬品を、排出としては紙ごみの焼却及び灰輸送と、紙・パルプ生産廃棄物の処理及び灰輸送をシステム境界内に含めて算定する。その際、加工を行っていない1次原料としての紙を対象とするので、機能単位として重量トンを用い、2.で述べた品目別に計算する。また、環境負荷としては、BOD、 CO_2 、 NO_x 、 SO_x 、ダイオキシン等が考えられるが、代表的な環境負荷として CO_2 排出量を取り上げる。消費エネルギーと CO_2 排出量の計算式を以下に示す。

①消費エネルギー

$$\text{TE} = \sum_k \text{QE}_k = \sum_k \text{VE}_k \times \text{GE}_k$$

QE_k ：投入燃料 k 発熱量 [kcal]

VE_k ：投入燃料 k 使用量

GE_k ：投入燃料 k 発熱原単位

② CO_2 排出量

$$\text{TW} = \sum_k \text{WE}_k = \sum_k \text{QE}_k \times \text{GW}_k$$

WE_k ：投入燃料 k CO_2 排出量 [炭素換算トン]

GW_k ：投入燃料 k CO_2 排出原単位

ただし投入燃料 k とは、電力、重油、ガソリン、石炭、都市ガス等のうち、個々の生産または輸送に利用されるものを言う。なお、発熱原単位は通産省石油等消費動態統計、 CO_2 排出原単位は環境庁二酸化炭素排出量調査報告書の値を用いた^(10~11)。各部門の構成を以下に述べる。

(1) パルプ部門及び紙生産部門

パルプには、チップを薬品と共に蒸解して作る（晒し及び未晒し）化学パルプ、機械的处理で作られる機械パルプ、化学処理と機械処理を併用した半化学パルプ（以上木材パルプ）と、機械的攪拌力と薬品により古紙を解離して作る古紙パルプがある。木材パルプは、輸入材からのパルプ、国産材からのパルプと、海外で生産されパルプとして輸入されるものとで構成されている（図6）。

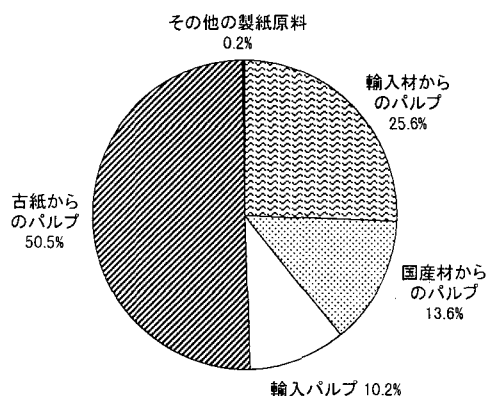


図6 製紙原料の内訳 (1997年)

そこでパルプ部門は、国産パルプについて、国内チップ製造、国内チップ輸送、原木・チップ輸送（海外～日本）、古紙輸送、国内パルプ生産の5項目で、輸入パルプについて、国外チップ製造、国外パルプ生産、パルプ輸送（海外～日本）の3項目により算定する。

このうち、チップ製造には投入燃料を、パルプ生産には投入燃料と水資源及び薬品使用量を加味している。古紙輸送については、古紙統計年報の地域連関表をもとに⁸⁾、9地域（北海道、東北、関東、中部、近畿、中国、四国、九州、沖縄）間の輸送量を設定した。輸送は、船またはトラックによるものと仮定して、トラック輸送の場合はガソリン・軽油消費係数〔リットル／トンキロ〕に輸送量と距離を乗じて、航路輸送については輸送船の規模を考慮した重油消費係数に輸送量と距離を乗じて投入燃料使用量を求め、消費エネルギー及びCO₂排出量を算出している。

以上のパルプ部門に対し、紙部門は紙の製造、そこに投入される水資源と薬品、及び消費燃料を含んでいる。パルプと紙の生産は、実際には、製紙工場内の連続した工程となっているところが多く、両生産間の輸送は省略した。

パルプ及び紙生産の消費エネルギー、CO₂排出量、生産費用の原単位を求め表1に示す。表1を見ると、古紙パルプは木材パルプに比べ消費エネルギーも非常に少なく生産原価も安い。つまり生産だけについて言えば、古紙のリサイクルが進むほど省エネルギーで経済的な傾向にあると推測される。しかし、図5に示したようにシステム内には種々の要素が存在し、また、2.で指摘したように古紙の利用には量・質両面の制約が生じるため、生産のみで一概に評価できないと考えられる。

表1 パルプ・紙の生産に関する原単位

部 門		記号	品 目	生産高	エネルギー 原単位	CO ₂ 排出 原単位	費用原単位
			単位	千トン	千 kcal /トン	kg /トン	円/トン
パルプ 部門	木材 パルプ	a	晒し化学	7,853	4,650	455	42,087
		b	未晒し化学	1,623	3,970	387	36,050
		c	機械	1,674	789	46	40,159
		d	半化学	196	4,221	401	27,089
	古紙 パルプ	x	脱墨または脱墨・漂白	3,775	787	83	20,174
		y	段ボール・雑誌古紙使用	10,748	135	15	13,950
紙部門				31,014	3,003	260	55,650

注：表中の原単位は製紙原料の輸送を含んでいない。

(2) 消費部門

消費には個人消費から産業消費まで色々な段階があるが、本研究では1次原料としての紙を対象とするため、卸売業者による小売業及び産業用出荷量を消費量として設定する。

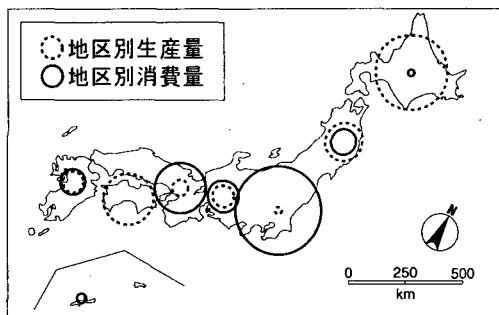
紙・パルプ統計年報より、(1)の9地域について地域別紙品目別消費量を求め、地域別紙品目別生産量と比較する。例として、新聞巻取紙とダンボール原紙についての比較を図7に示す。図7より、新聞巻取紙の場合は、生産量の多い地域と消費量の多い地域が異なる原料立地型で、生産後消費地への地域間輸送が必要となることが分る。一方、ダンボール原紙の場合は、消費地と生産地が比較的一致しており、地域内の短距離輸送により賄える特性を有している。同様に、衛生用紙や紙器用板紙はダンボール原紙に似たユーザー立地型であり、印刷・情報用紙は生産量の地域格差が小さく中間的な地域間構造であることが明らかとなった。

消費部門では、この地域間構造より紙品目別輸送量を推定し、(1)の輸送と同様な方法により、消費エネルギー、CO₂排出量を算定する。費用については、一般貨物運送事業の平均的な営業費用内訳から算出する。

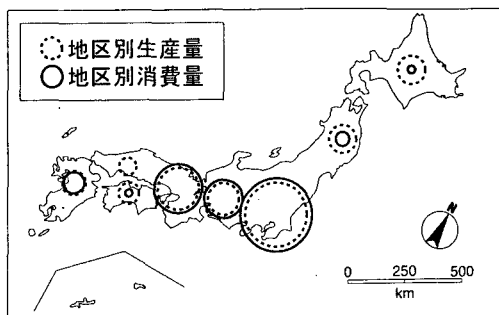
(3) 古紙及び廃棄物部門

消費された紙は、最終的に古紙原料または紙ごみとして回収される。ここでは、面的に分布する消費された紙を、収集車が巡回して回収拠点(古紙問屋またはごみ焼却場)へ集積すると仮定し、古紙または紙ごみの発生密度(発生量/面積)を考慮したメッシュ状回収モデルを設定した。東京都清掃局のデータをもとに^{12~13)}、可住地区人口密度を用いて全国平均回収距離を求めた結果、紙ごみの回収距離は33(km)、同様に人口集中地区人口密度による換算の結果古紙回収距離は22(km)と推定され、これらの値に燃料消費係数を乗じて投入燃料使用量を算定する。

また、紙ごみの焼却、及び紙・パルプ生産廃棄物である汚泥の焼却に伴うCO₂排出、両者の焼却灰輸送(輸送距離50kmと仮定)に伴う消費エネ



(a) 新聞巻取紙



(b) 段ボール原紙

図7 地域別生産量と消費量の比較

ルギー及びCO₂排出もこの部門に含まれる。

回収費用の算定は、古紙については古紙卸売業の平均的な回収原価から、紙ごみについては東京都清掃局の実績単価から、それぞれ回収量を乗じて求めるものとする⁹⁾。

以上により紙マテリアルフローモデルが構築される。このモデルに地域別品目別紙生産高及び古紙回収量を入力することにより、システム全体としての消費エネルギー、CO₂排出量及び総費用を定量化することが可能となった。

4. ライフサイクルインベントリー分析

ここでは、3. で得られたモデルを用いて、紙マテリアルフローの消費エネルギー、CO₂排出量及び総費用を算定する。そして、過去及び将来(紙リサイクル促進時)との比較検討を行って、環境への影響と費用の両面から紙リサイクル代替案を評価する。

(1) 現状（標準ケース）の算定結果

1997年の算定結果を図8に示す。全国における紙マテリアルフローの消費エネルギー総計は、 $183,909 \times 10^9 \text{kcal}$ 、 CO_2 排出量は22,516千トン、総費用は44,371億円となった。

ここで各指標の部門内訳を検討する。まず消費エネルギーでは、パルプ及び紙生産部門がシステム全体の9割以上を占めており、エネルギー消費にとって紙輸送（消費部門）、古紙輸送及び紙ごみの輸送は、今のところ小さなウェイトに留まっている。つぎに CO_2 排出量では、パルプ及び紙生産部門が消費エネルギーと同様主要な要因となっておりと同時に、紙ごみ焼却による CO_2 排出量が全体の約4分の1を占めていることが分る。

さらに総費用の内訳では、パルプ及び紙生産部門の割合が減少し、代って紙輸送及び古紙輸送のウェイトが増加している。近年、紙・パルプ産業では、大規模化、機械の改良による効率化を行って固定費を押さえコスト削減を図ってきている。一方、消費、古紙、紙ごみ部門では、規模の制約もあってランニングコストとしての消費エネルギーに対し、総コストが大きくなっているものと推察される。

(2) 1975年との比較分析

(1)で明らかになった3指標の特徴は、現状の古紙リサイクル（回収率 53.1%）を前提としている。一方、1975年の古紙回収率は38.6%に過ぎず、紙消費量の約2/3は廃棄物として処理されていた。

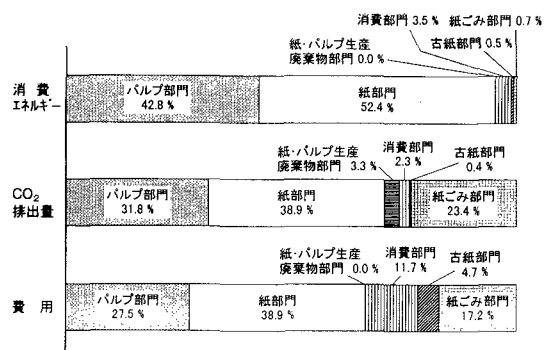


図8 標準ケース（1997年）の部門内訳

この間におけるリサイクルの進展は、オイルショック後の消費経済の見直しや、古紙利用技術の確立、産業及び消費者の古紙回収に対する積極的な取り組み等の結果として実現したものである。

そこで、リサイクルの進展がもたらした効果を推定するため、1975年の古紙消費率（表2）を紙マテリアルフローモデルに代入して、消費エネルギー、 CO_2 排出量及び総費用を算定し、標準ケースと比較する。その際、脱墨古紙パルプ（表1のx）の減少分は晒し化学または機械パルプ（同a,c）で、ダンボール等古紙パルプ（同y）の減少分は未晒し化学または半化学パルプ（同b,d）で代替されるものとする。また、紙生産高、輸出入及び在庫量については現状値を固定して算定した。結果を表3に示す。

表2 古紙消費率の比較

紙品目	単位：%	
	1997年	1975年
新聞巻取紙	50.3	36.4
印刷・情報用紙	18.2	13.2
包装用紙	5.1	3.7
衛生用紙	50.2	36.3
雑種紙	1.6	1.2
段ボール原紙	96.4	69.7
紙器用板紙	85.9	62.1
建材原紙	86.5	62.6
その他板紙	85.5	61.9
回収率	(53.1)	(38.6)

表3 1975年と1997年の比較

	消費エネルギー G kcal	CO_2 排出量 千トン-C	費用 億円
1975年	203,834	26,088	46,263
1997年	183,909	22,516	44,371
削減量	19,925	3,572	1,892

標準ケース（1997年）と1975年の差分を求めると、消費エネルギーは $19,925 \times 10^9 \text{kcal}$ 、 CO_2 排出量は3,572千トン、総費用は1,892億円となり、紙リサイクルの進展により全ての指標について削減効果が得られていることが分る。このうち消費エネルギーでは、古紙利用による紙ごみの減少により紙ごみ部門では1975年に比べ25%の削減、パル

ブ生産部門で古紙利用による省エネで20%の削減となっており、一方古紙回収のためのエネルギーは38%増となるが、トータルでは10%程度エネルギーを節約できていると推定される。CO₂排出量では、パルプ生産部門での削減と同時に、紙ごみ焼却における削減量が大きく、紙リサイクルによるCO₂排出抑制はトータルで14%程度となる。費用としては、古紙回収及び古紙原料輸送費用が増加するが、紙ごみ部門の費用は減少するので、システム全体としては費用減となり経済的であると考えられた。

(3) リサイクル促進シナリオによる比較分析

最後に、紙リサイクルの促進に伴う削減効果を検討するため表4に示す3シナリオを設定する。シナリオAは、包装袋や軽包装紙といった包装容器リサイクル法に含まれる紙類を古紙100%にするものである。ただし、包装用紙にはセメント等の重袋のように強度を求められる品目が含まれており、品目としての古紙消費率は62%となる。シナリオBは印刷・情報用紙の古紙利用を促進したものである。現在、古紙消費率が低く消費量の多いこの品目は、白色度低下に対する受入れが可能となれば技術的には殆ど問題なく古紙消費率の増加が期待できる品目と考えられる。さらに、回収率を2000年で56%にしようとする日本製紙連合会の計画目標値を参考に、包装用紙はシナリオAに、印刷・情報用紙はシナリオBに合せたシナリオCを設定した。

ここで、古紙消費率を上げるためには回収率を上げる必要があるが、そのためには消費者の協力ときめ細やかな回収が必要となり平均回収距離も加速的に増大すると予想される。本論文では、将来の回収率が80%以上となる品目については、回収距離及び回収単価が現状の約1.5倍要するものと仮定して算定している。

各シナリオによる算定結果を図9に示す。図9は3指標についての効果を比較するため、標準ケースのそれぞれの算定値を100として各ケースの算定値を基準化して表している。リサイクルの促進により、多少費用は増加するものの消費エネルギー及びCO₂排出量を削減でき、環境への負荷を

低減可能なことが分る。3シナリオの中ではシナリオBが、費用の割に消費エネルギー及びCO₂排出量の削減効果が大きく、印刷・情報用紙における古紙利用の推進がより効率的であると判断された。なお、シナリオB実現のためには、今後、白色度の低い古紙配合率が高い用紙を、消費者が前向きに利用することが前提となる。

表4 リサイクル促進シナリオにおける古紙消費率

単位：%

紙品目	シナリオA	シナリオB	シナリオC
新聞巻取紙	50.3	50.3	60.0
印刷・情報用紙	18.2	60.0	60.0
包装用紙	61.9	5.1	61.9
衛生用紙	50.2	50.2	65.0
雑種紙	1.6	1.6	1.6
段ボール原紙	96.4	96.4	96.4
紙器用板紙	85.9	85.9	94.0
建材原紙	86.5	86.5	94.0
その他板紙	85.5	85.5	94.0
回収率	(55.3)	(68.1)	(73.0)

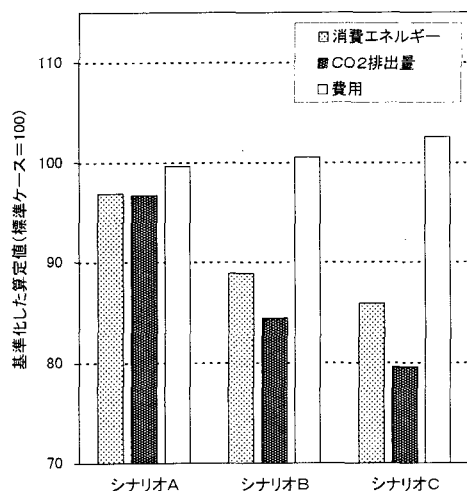


図9 リサイクル促進シナリオによる算定結果

低減可能なことが分る。3シナリオの中ではシナリオBが、費用の割に消費エネルギー及びCO₂排出量の削減効果が大きく、印刷・情報用紙における古紙利用の推進がより効率的であると判断された。なお、シナリオB実現のためには、今後、白色度の低い古紙配合率が高い用紙を、消費者が前向きに利用することが前提となる。

5. おわりに

本研究では、紙リサイクル計画を策定する際の情報提供ツールとして、環境負荷及び費用を算定

できるライフサイクルモデルを提案した。

すなわち、古紙利用の現状分析を行って紙品目別のリサイクル特性を把握した上で、生産から最終的な廃棄までの紙マテリアルフローについて地域間輸送を考慮したモデル化を行った。さらに、本モデルを用いて古紙消費率の変化によるシナリオ分析を行って、環境負荷及び費用による比較評価方法を提示した。

以上の結果、紙リサイクルにおける環境影響削減と総費用間のトレードオフを定量化することが可能となり、ライフサイクルにおける各段階の位置づけ及びリサイクル代替案の評価が可能となった。今後の古紙利用促進シナリオ実現のためには、経済的には回収コスト増が問題となるので、生産者、行政、消費者間でどのようにコストを分担するかを検討していく必要がある。

今回は、全国ベースでの平均的な分析となっているが、地域特性やリサイクル規模を考慮した評価のためのモデル化も同様な方法により可能であると考えている。なお、紙のリサイクルには、サーマルリサイクルや製紙原料以外へのリサイクルもあるが本モデルには含まれていない。

また、安定した供給源として古紙の分別の可能性、需要サイドでの再生紙に対する品質要求の適正化もリサイクル促進にとって重要なファクターと考えられる。このためには、アンケート調査等を行って消費者意識・行動を分析していくことも必要であると考えている¹⁴⁾。

参 考 文 献

- 1) 井上陽仁・羽原浩史・田中信壽・松藤敏彦「都市ごみ処理システムの適性評価のための指標検討」、『第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集』p.25-27, 1996.
- 2) 天野耕治・村田真樹「マテリアルフロー分析を用いたセメント・コンクリート産業の環境負荷評価」、『環境システム研究』Vol.26, p.391-396, 1998.
- 3) 中村慎一郎「廃棄物処理と再資源化の産業連関分析」、『廃棄物学会論文誌』Vol.11, No.2, p.18-27, 2000.
- 4) 寺園淳・山辺浩・酒井伸一・高月紘「ライフサイクルアセスメントとコストの視点からみたPETボトルリサイクル」、『第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集』p.115-117, 1996.
- 5) 環境庁企画調整局環境研究技術課『ライフサイクルインベントリー分析の手引き』化学工業日報社, p.3-36, 1998.
- 6) 小泉明・稲員とよの・小野寺えびね「都市ごみの再利用による減量化効果に関する研究」、『環境システム研究』Vol.25, p.239-247, 1997.
- 7) 通商産業大臣官房調査統計部『紙・パルプ統計年報 1997年, 1992年, 1987年版』通産統計協会.
- 8) 古紙再生促進センター『古紙統計年報 1997年度版』
- 9) 小泉明・稲員とよの・岡田阿礼「紙リサイクルに関する費用・エネルギー分析」、『都市と廃棄物』Vol.29, No.12, p.17-25, 1999.
- 10) 通商産業大臣官房調査統計部『平成9年石油等消費動態統計(製造工業)』通産統計協会, p.5.
- 11) 環境庁地球環境部『二酸化炭素排出量調査報告書』p.11, p.15, 1992.
- 12) 東京都清掃局ごみ減量対策室『事業概要 平成9年版』
- 13) 谷川昇・武本敏男「都市ごみの処理・処分に伴う窒素酸化物排出原単位」、『第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集』p.129-131, 1996.
- 14) 小泉明・小田原康介・谷川昇・及川智「都市ごみの排出実態と減量化意識に関する数量化分析」、『廃棄物学会論文誌』Vol.12, No.1, p.17-25, 2001.

Key Words (キー・ワード)

Paper Recycling (紙リサイクル), Life Cycle (ライフサイクル), Energy Consumption (エネルギー消費), Environmental Emission (環境負荷), Cost Analysis (費用分析)

Modelling of Paper Material Flow by Life Cycle Inventory Analysis

Toyono Inakazu*, Akira Koizumi* and Are Okada*

*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.74, 2001, pp.93-103

We have much concern with the reuse of goods and materials in order to conserve natural resources. Paper waste take a half portion of combustible wastes for incineration disposal, so the promotion of paper recycling gives us reductions of environmental emissions and effective utilization of natural resources. The model, which gives an account of changes by paper recycling, is needed to make an agreement among producers, consumers, and administrators about a satisfactory attainment level.

LCA can account environmental emissions of system processes with inputs and outputs throughout the life cycle. In this study, we apply the Inventory Analysis of LCA to the paper material flow that contains paper production, consumption, reuse, and waste treatment. And we propose a model by which we can calculate the consumption of natural resource, the reduction of environmental emission and overall cost.

Our model takes into account of paper quality constraints in reuses, and also the regional gaps between paper production and consumption. The model is used to evaluate environmental and economic effects of alternative recycling that gives us useful information for paper waste recycle planning.